

平成20年10月20日  
高松塚古墳劣化原因検討会

# 高松塚古墳墳丘部の地震痕跡に 関する検討について

三村 衛 (京都大学防災研究所)

## 近畿地方に被害をもたらした地震


地震発生日	固有地震名・通称	震源域	マグニチュード M	地震種別	出典
599.05.28		大和	7	内陸	古文書
684.11.29		南海	8.25	プレート	古文書
827.08.11		京都	6.5~7.0	内陸	古文書
856		京都	6.0~6.5	内陸	古文書
868.08.03		播磨・山城	7.0以上	内陸	古文書
881.01.13		京都	6.4	内陸	古文書
887.08.26		南海	8.0~8.5	プレート	古文書
890.07.10		京都	6	内陸	古文書
934.07.16		京都	6	内陸	古文書
938.05.22		京都・紀伊	7	内陸	古文書
976.07.22		山城・近江	6.7以上	内陸	古文書
1070.12.01		山城・大和	6.0~6.5	内陸	古文書
1091.09.28		山城・大和	6.2~6.5	内陸	古文書
1093.03.19		京都	6.0~6.3	内陸	古文書
1096.12.17		東南海	8.0~8.5	プレート	古文書
1099.02.22		南海	8.0~8.3	プレート	古文書
1177.11.26		大和	6.0~6.5	内陸	古文書
1185.08.13		近江・山城	7.4	内陸	古文書
1317.05.27		京都	6.5~7.0	内陸	古文書
1325.12.05		近江北部	6.25~6.75	内陸	古文書
1331.08.15		紀伊	7.0以上	内陸	古文書
1350.07.16		京都	6	内陸	古文書
1360.11.22		東南海?	7.5~8.0	プレート	古文書
1361.08.03		南海	8.25~8.5	プレート	古文書
1403		紀伊	7.0以上	プレート?	古文書
1480.01.21		紀伊・伊勢	7.5~8.0	プレート?	古文書
1449.05.13		山城・大和	5.75~6.5	内陸	古文書
1494.06.19		奈良	6	内陸	古文書
1498.09.20		南海東南海	8.2~8.4	プレート	古文書
1510.09.21		摂津・河内	6.5~7.0	内陸	古文書
1520.04.04		紀伊・京都	7.0~7.75	プレート?	古文書
1579.02.25		摂津	5.75~6.25	内陸	古文書
1586.01.18	天正地震	白川断層	7.7~7.9	内陸	古文書
1596.09.05	慶長伏見地震	有馬高槻	7.25~7.75	内陸	古文書
1605.02.03	慶長南海地震	南海東南海	7.9	プレート	古文書
1662.06.16	寛文地震	琵琶湖西岸	7.25~7.6	内陸	古文書
1665.06.25		京都	6	内陸	古文書
1707.10.28	宝永南海地震	南海東南海	8.4	プレート	古文書
1711.12.20		讃岐中部	6.7	内陸?	古文書
1751.03.26		京都	5.5~6.0	内陸	古文書
1789.05.10		阿波	6.9~7.1	内陸	古文書
1819.08.02		伊勢・美濃	7.0~7.5	内陸	古文書
1830.08.19		京都・隣国	6.3~6.7	内陸	古文書
1854.07.09	伊賀上野地震	木津川断層	7.0~7.5	内陸	古文書
1854.12.23	安政東海地震	東南海	8.4	プレート	古文書
1854.12.24	安政南海地震	南海	8.4	プレート	古文書
1864.03.06		播磨・丹波	6.3	内陸	古文書
1891.10.28	濃尾地震	愛知・岐阜	8	内陸	観測事実
1899.03.07		紀伊大和	7	スラブ内	観測事実
1906.05.05		紀伊中部	6.2	内陸	観測事実
1909.08.14	江濃(姉川)地震	滋賀	6.8	内陸	観測事実
1916.11.26		神戸	6.1	内陸	観測事実
1925.05.23	北但馬地震	但馬北部	6.8	内陸	観測事実
1927.03.07	北丹後地震	北丹後	7.3	内陸	観測事実
1936.02.21	河内大和地震	河内大和	6.4	内陸	観測事実
1938.01.12		田辺湾沖	6.7	プレート?	観測事実
1944.12.07	昭和東南海地震	東南海	7.9	プレート	観測事実
1946.12.21	昭和南海地震	南海	8	プレート	観測事実
1949.01.20		兵庫県北部	6.3	内陸	観測事実
1952.07.18	吉野地震	奈良県中部	6.8	スラブ内	観測事実
1955.07.27		徳島県南部	6.7	内陸?	観測事実
1961.08.19	北美濃地震	福井・岐阜	7	内陸	観測事実
1963.03.27	越前岬沖地震	福井県沖	6.9	内陸	観測事実
1995.01.17	兵庫県南部地震	六甲・淡路	7.2	内陸	観測事実

宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧より

## 発掘調査によって発見された地震痕跡

- ↑ トレンチ調査によって、古墳墳丘の版築内に地震によると思われる地割れの存在が確認
- ↑ 原因となりうるのは、古墳構築（7世紀末）後の地震であるが、年代の同定などは不可能
- ↑ 明日香周辺に震度5強～6級の揺れを与える地震としては、東南海・南海地震が最も可能性が高い
- ↑ 墳丘内の地割れは古墳・壁画にどのような影響を及ぼすのか？





地震による地割れ

版築構造

平成16年度調査時に撮影

## 墳丘上部のトレンチ（平成18年10月，11月撮影）



左：もちの木（モチノキ）の根が地震による地割れを選択して墳丘奥深くまで侵入

右：ひび割れの域を超えた10cmオーダーの割れが認められる



## 石室直上10cm地点の白い版築（平成19年2月28日撮影）



左：石室直上の墳丘に走る地震痕跡 石室の形が亀裂の形から想像できる  
右：地震亀裂の三次元的な広がり様子（南東側より撮影）

地震時に、下を石室で支えられている石室直上の土は大きく動かず、下に石室のない墳丘部は部分的に破壊を起こして下方に滑ろうとするために、その境界部となる石室周囲において地割れが発生した。一方、下方に動いた墳丘土は円周方向に引っ張り力が発生するので放射状の亀裂が生じたものと考えられる。

# 原位置試験（現地で実施する試験）による検討

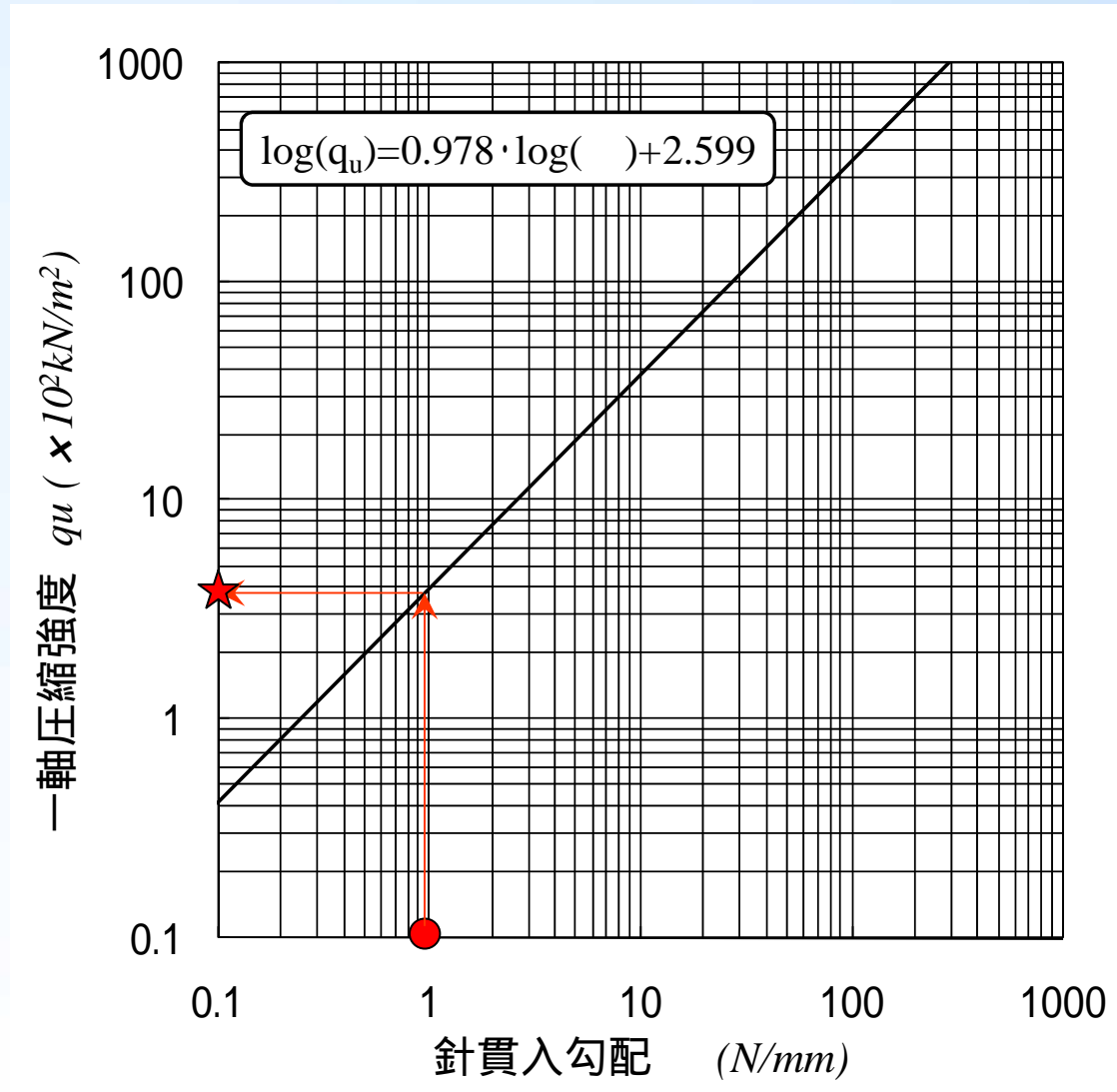
- ↑ 特別史跡である古墳墳丘にダメージを与えない手法として軟岩ペネトロメータ（針貫入試験）を実施  
健全な版築部分と亀裂内部の土の強度を比較し、  
亀裂部分の強度低下の程度を確認する
- ↑ 平成16年度に実施したボーリング調査で設置した3本のボーリング孔を用いたPS検層試験を実施  
弾性波の速度を測定することにより、地盤としての  
の硬さ（剛性）を把握する

# 針貫入試験機とその実施状況

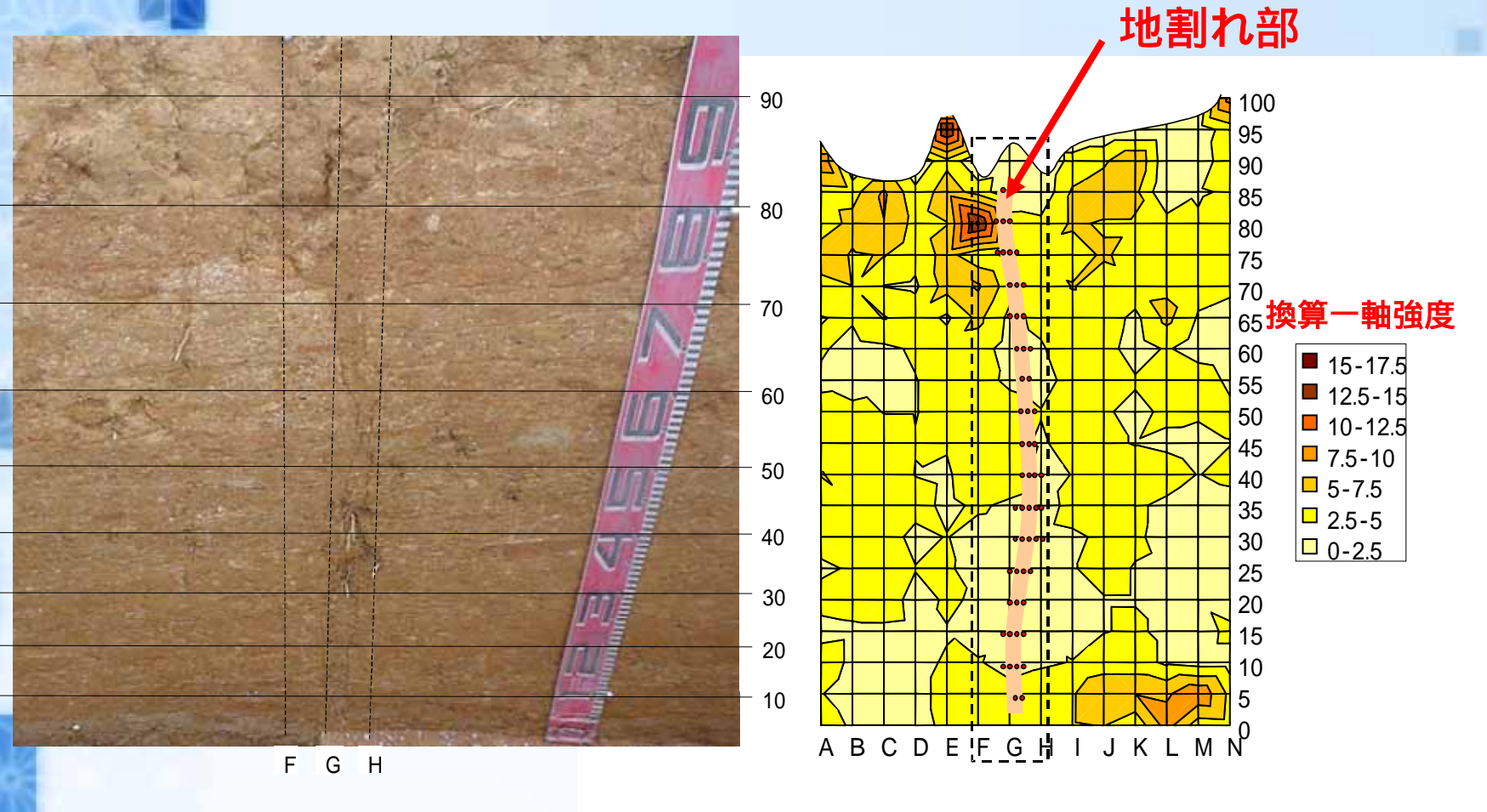




# 針貫入試験機の較正曲線



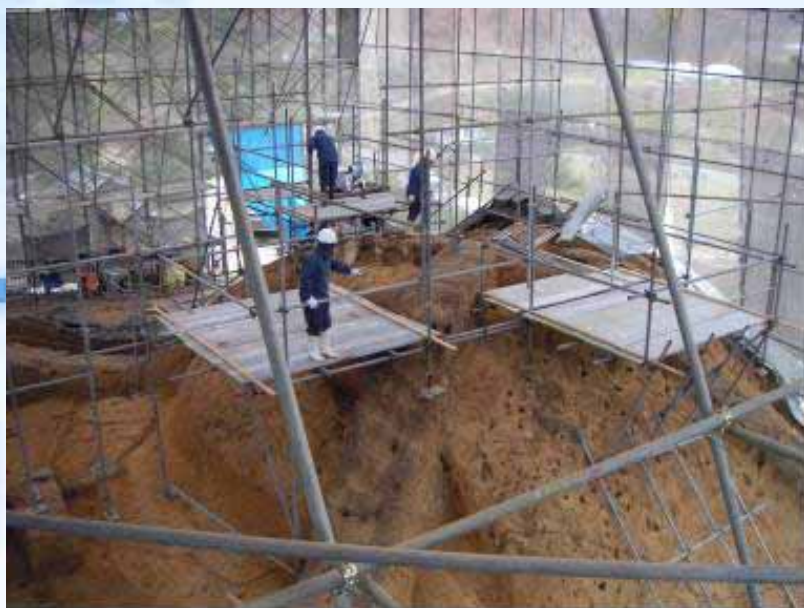
# トレンチ内針貫入試験による強度比較



周囲版築に比べて割れ目内部の強度は低い

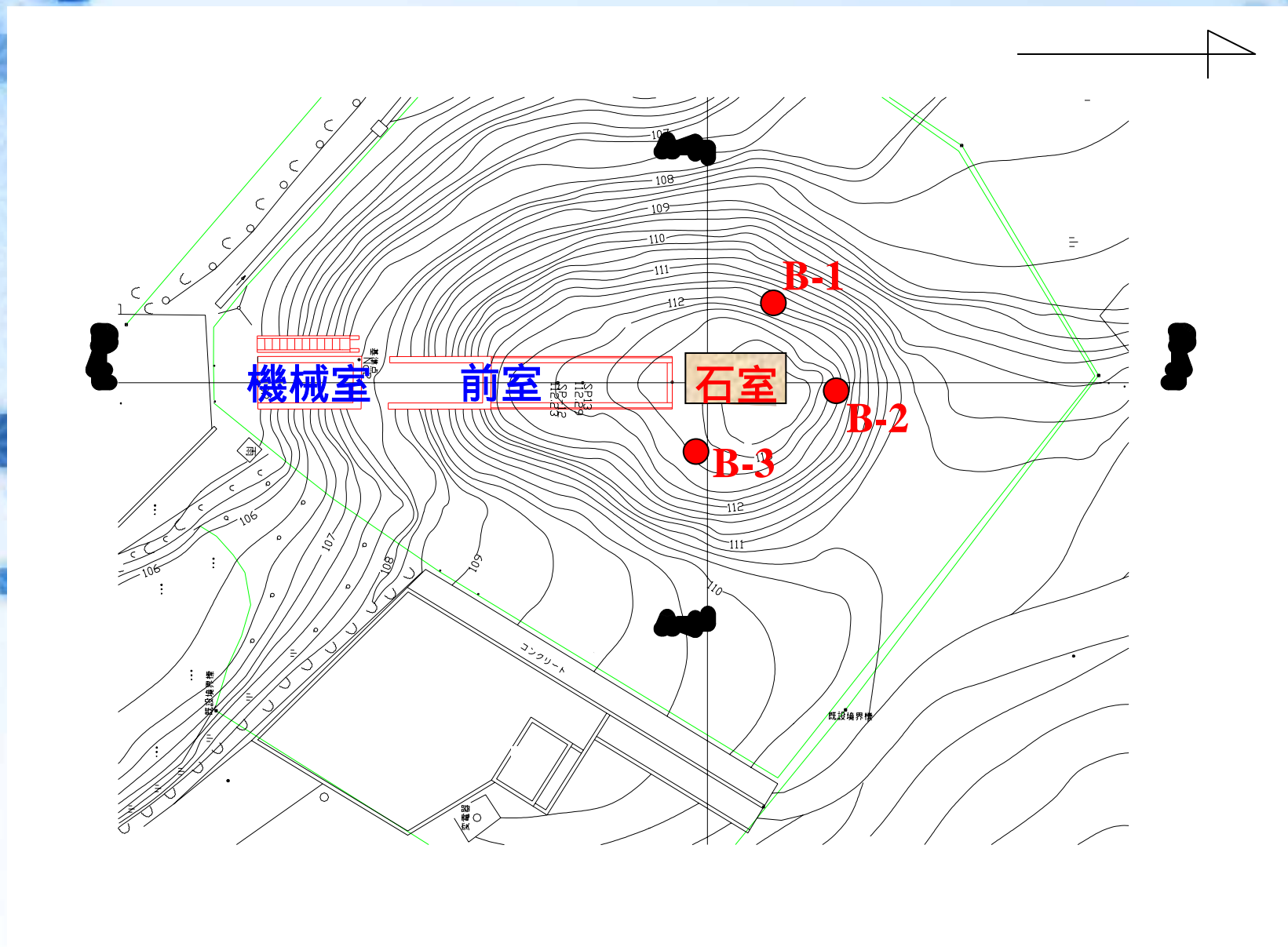
# ボーリング仮設足場遠景と作業

マシンの騒音・振動による漆喰表面壁画への影響防止  
吊り足場（仮覆屋の基礎から単管組上げ方式による）  
ディーゼルエンジンではなく電気によるボーリング

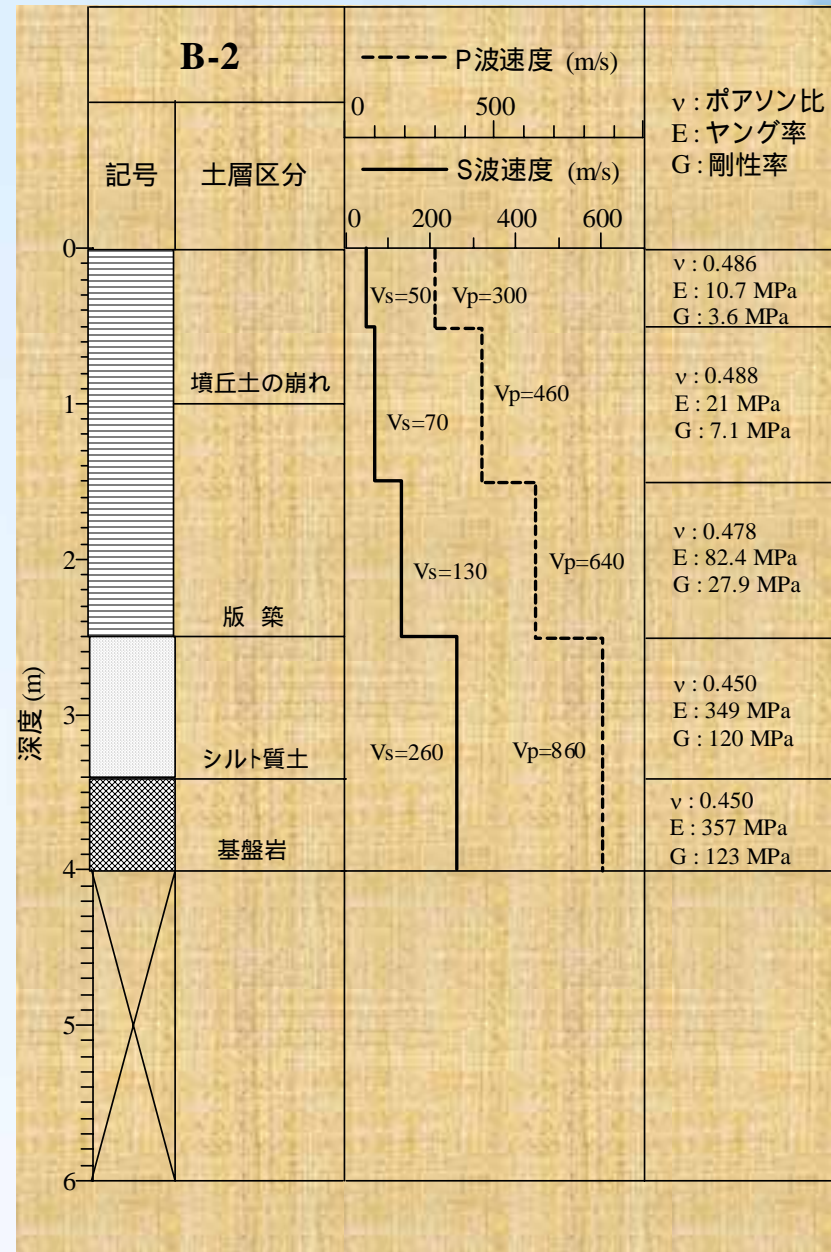
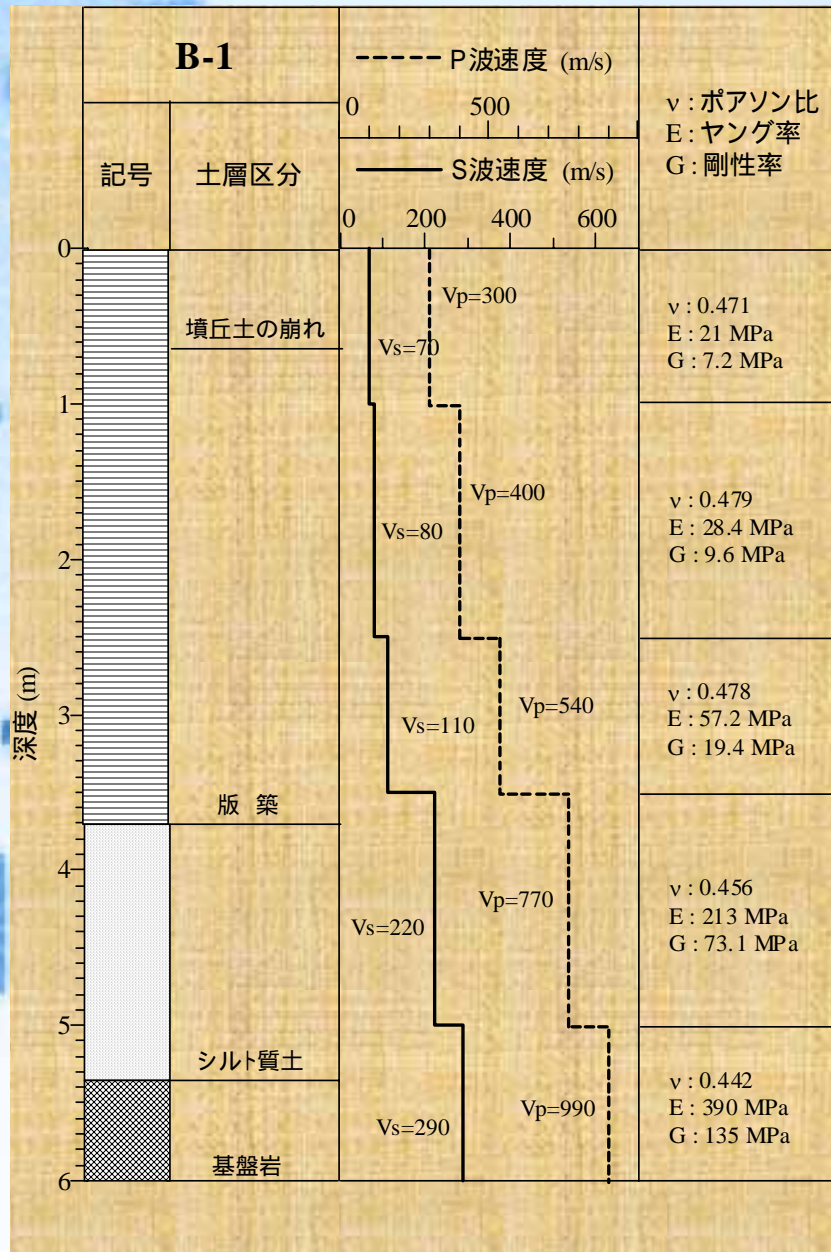




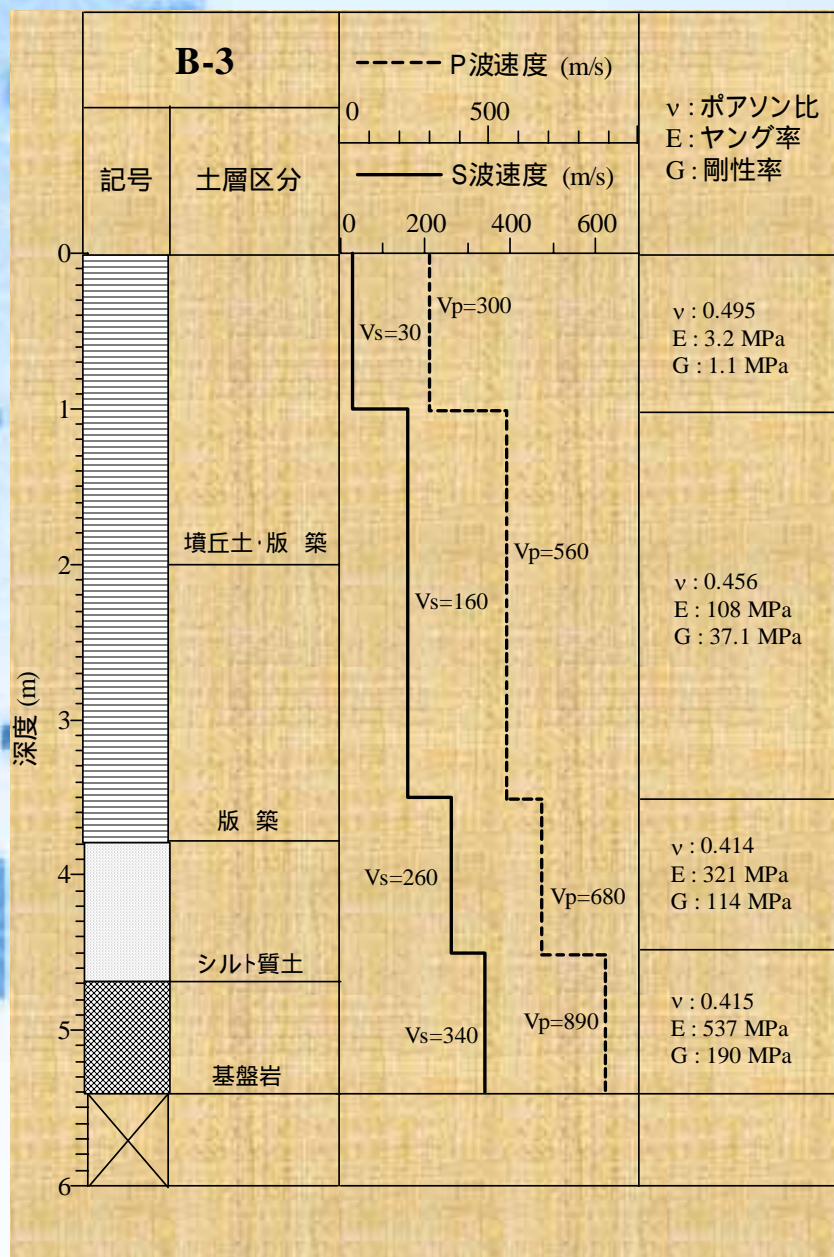
# 高松塚古墳墳丘平面とボーリング調査，試料採取位置



# 墳丘のPS速度検層結果 (1)



# 墳丘のPS速度検層結果（2）



## 得られた知見

- ・ 不飽和地盤であり，P波速度は遅く，1000m/sを下回る。
- ・ 地山部分のS波速度はおよそ300m/sである。
- ・ 版築部分のS波速度は70～160 m/s となっている。

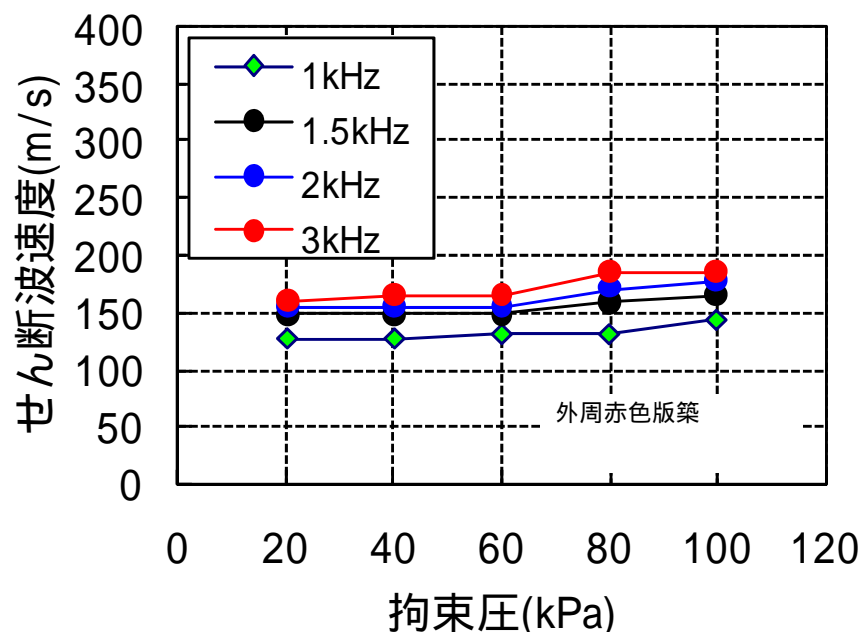
締固めて構築した版築土の強度値が針貫入試験から得られているが，その値とS波速度の70～160m/sという低い値は整合しない。

亀裂の存在により波動の伝播が悪くなっている可能性がある。



# ベンダーエレメント試験による試験体レベルのS波速度

- ・厚さ0.1mmのりん青銅のコアを0.5mmのエポキシ樹脂でコーティングしたもので、電気信号によって任意の周波数で振動させることができる。
- ・直径50mm，高さ100mmの亀裂のない健全な状態の試験体を設置する架台とキャップにベンダーエレメントを固定し，各7mmを試験体上下端に挿入，固定する。
- ・下端の発信側ベンダーエレメントを振動させ，試験体を通して上端の受信側ベンダーエレメントで波を受ける。この時のS波の発信から受信に至る時間を測定してS波速度を測定する。



- ・周波数依存性が若干あるが，およそ150～200m/sの値を示している。
- ・現地のPS検層試験から得られている70～160m/sに比べてかなり大きい値となっており，版築土が健全状態であれば，このくらいの値が出るのがわかる。
- ・現地の墳丘のS波速度は，縦横に走る地割れの影響で低下しているものと判断できる。

## 地震による墳丘内部の地割れの影響

- あるトレンチ断面で発見された 地割れはその断面のみにあるのではなく、墳丘内部に三次元的に広がっていると考えるのが自然である。
- 地割れ内部は版築層に比べて緩く、弱い。
- 水が流れやすく、強度や剛性が小さいため、水の浸透、弱面となる可能性がある。
- 全体として墳丘の安定性（特に地震時）と透水性（カビなどの原因となる）が古墳にとっては深刻な問題となる。

# 高松塚古墳地震被害の検討計画

- 発掘によって見いだされた墳丘および石室に残る地震痕跡を数値解析によって検討し，地割れや石室の傾きといった被災要因となりうるかどうかを明らかにする。
- 今年度からの複数年で実施することとし，初年度は，内部に剛性の高い石室を抱える版築構造を有する古墳本体に地震外力が作用した場合に，墳丘がどのような応力状態となり，ひずみの集中現象（破壊に直結する）のようなモードで生じるのかといった基礎的なデータを取得するための検討を行う。
- 次年度以降については，本年度の基礎データに基づいて，実物に近いモデル化を行い，基盤の傾斜や作用する地震外力の違いによる被災モードの影響について明らかにする。
- 一連の結果に基づいて，高松塚古墳の地震被害の実態を明らかにする。



# 地震による墳丘部の亀裂発生への影響検討

【目的】高松塚古墳に見られた墳丘部の亀裂に対する地震による影響について検討するために動的FEM解析を実施し、地震力による墳丘部の变形およびひずみ発生挙動を解析し、亀裂発生のメカニズムを明らかにする。

## 【検討内容】

### 1) 墳丘部の動的FEM解析 亀裂発生メカニズムの検討

#### 解析条件

モデル化範囲: 石室を含む墳丘部のモデル化(3次元)

解析モデル: 墳丘部 非線形モデル(ROモデル)

石室 弾性体

入力地震動: 正弦波

周波数 0.1, 0.5, 1.0Hz

最大加速度 200, 400, 600gal)

#### 解析結果

墳丘の变形

せん断ひずみ分布

平均応力の変化状況

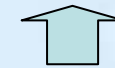
#### 亀裂発生のメカニズム

- ・せん断ひずみが卓越する箇所
- ・引張応力が作用する箇所



版築の下層に続く地震痕跡

H20年度検討



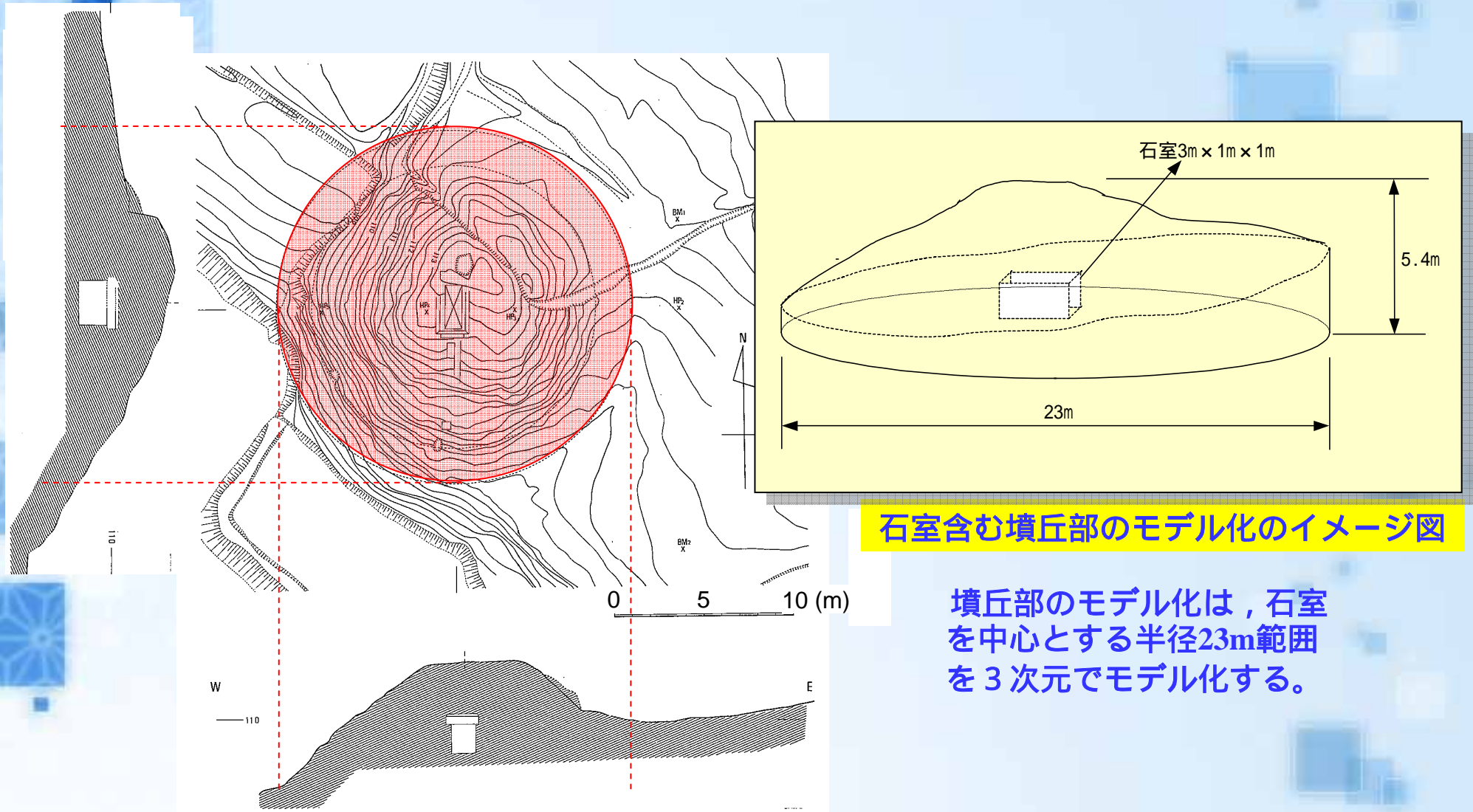
来年度以降の検討

### 2) 全体モデルによる動的解析 高松塚古墳における亀裂と地震の因果関係

モデル化範囲: 当該地の全体地形を考慮したモデル。 基盤面まで

入力地震動: 当該地における想定地震動

# 墳丘部のモデル化のイメージ図



石室含む墳丘部のモデル化のイメージ図

墳丘部のモデル化は、石室を中心とする半径23m範囲を3次元でモデル化する。

高松塚古墳の墳丘実測図とモデル化範囲